

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

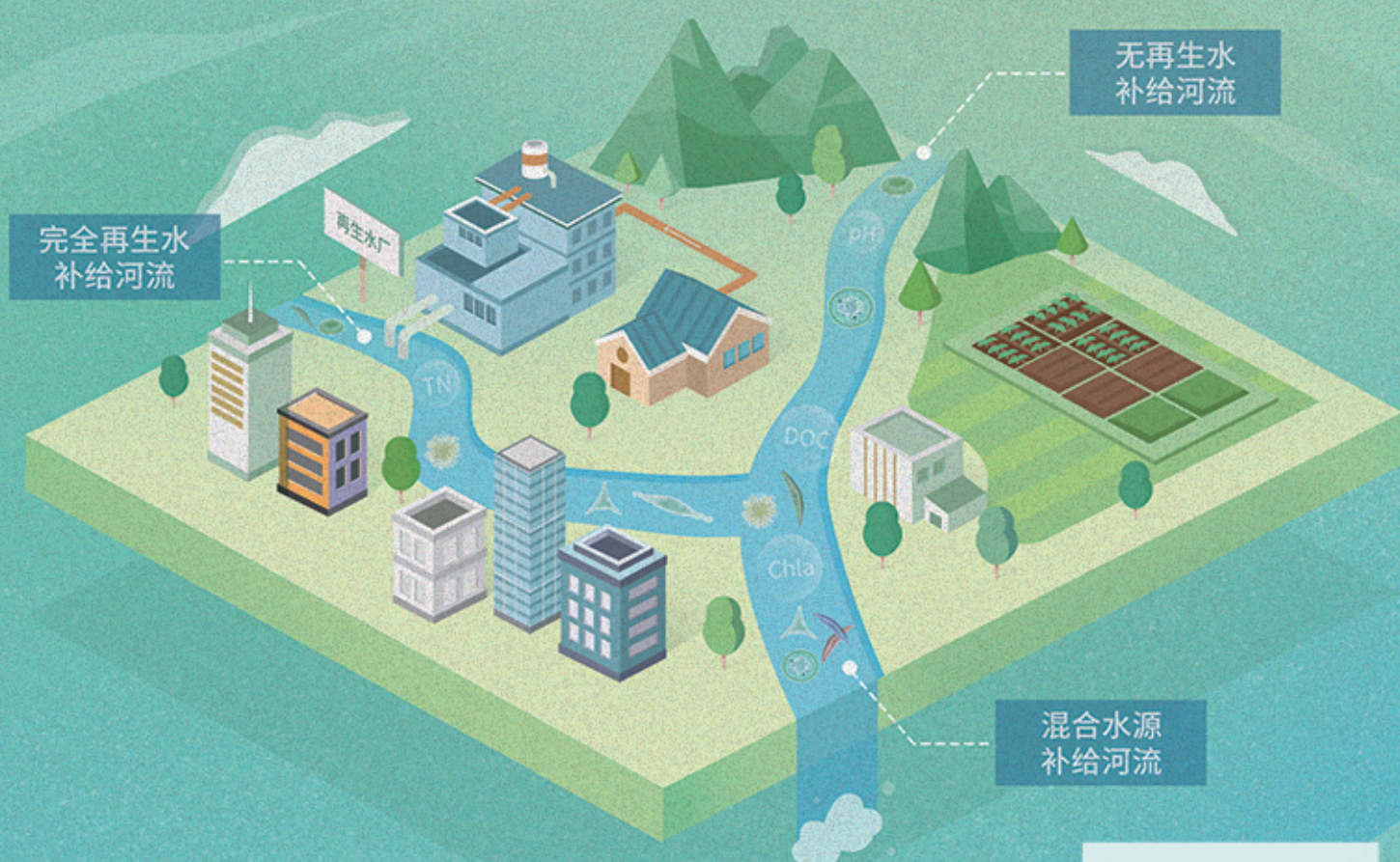
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩群 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜璨, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测

严薇^{1,2}, 刘舒乐¹, 吴正方², 高庆先¹, 杜海波², 马占云^{1*}, 冯鹏³

(1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 东北师范大学长白山地理过程与生态安全教育部重点实验室, 长春 130024; 3. 中国资源卫星应用中心, 北京 100094)

摘要: 为模拟废弃物焚烧处理过程中产生的温室气体排放, 积极推动温室气体减排工作, 早日实现碳达峰碳中和目标. 基于系统动力学和 IPCC 温室气体排放计算方法, 构建了以基准情景(BAU)为基础, 从单一和综合技术类型减排情景出发的焚烧处理温室气体排放模型, 并模拟预测了 2010~2050 年温室气体排放量(以 CO_{2e} 计, CO_{2e} 为 CO₂ 当量)的趋势变化、减排潜力以及空间分布. 结果表明: ①2010~2019 年我国废弃物焚烧处理温室气体排放量呈增长趋势, 于 2016 年后显著提升, 年增速为 18.61%. ②2020~2050 年, 单一技术减排情景的中端改进情景(S2)和终端减排情景(S3)温室气体排放量分别于 2043 年和 2036 年达到峰值 8 410 万 t 和 6 966 万 t. 综合技术减排情景相较于单一技术减排情景较早达到排放峰值, 综合技术减排情景中全过程减排情景(S7)采用多种减排技术协同控制温室气体排放, 2050 年累积排放量为 205 927 万 t, 相对 BAU 情景减排了 78.27%, 排放达峰时间最早且减排潜力最大. ③焚烧处理温室气体排放空间差异显著, 排放量较多的省份主要分布在人口密集且经济发达的区域, 江苏和广东省排放量最多, 甘肃、吉林和宁夏等 6 个省份为排放低值区.

关键词: 焚烧处理; 温室气体排放; 排放情景; 碳达峰; 碳中和

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5470-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201190

Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste

YAN Wei^{1,2}, LIU Shu-le¹, WU Zheng-fang², GAO Qing-xian¹, DU Hai-bo², MA Zhan-yun^{1*}, FENG Peng³

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Key Laboratory of Geographical Processes and Ecological Security of Changbai Mountain, Ministry of Education, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 3. China Resource Satellite Application Center, Beijing 100094, China)

Abstract: The aim of this study was to simulate the greenhouse gases (GHG) generated during the waste incineration process and to achieve the goal of carbon peaking and carbon neutrality as soon as possible. Based on system dynamics and IPCC GHG emission calculation methods, GHG emission models of incineration treatment for the baseline scenario (BAU), single technology emission reduction scenarios, and integrated technology emission reduction scenarios were constructed. Additionally, the trend changes, emission reduction potential, and spatial distribution of GHG emissions (with CO_{2e} as the CO₂ equivalent) were simulated and projected from 2010 to 2050. The results showed that: ① From 2010 to 2019, GHG emissions from waste incineration showed an increasing trend, with the annual growth rate increasing to 18.61% after 2016. ② In the mid-range improvement scenario (S2) and the terminal emission reduction scenario (S3) of the single technology emission reduction scenarios, GHG emissions would peak at 84.1 Mt and 69.66 Mt in 2043 and 2036, respectively. The integrated technology emission reduction scenario reached the peak of emissions earlier than the single technology emission reduction scenario. From 2020 to 2050, the total emission reduction scenario (S7) adopted a variety of emission reduction technologies to control GHG emissions, and the cumulative emission in 2050 was 2 059.27 million t, which was 78.27% relative to that in the BAU scenario, with the earliest emission peaking time and the largest emission reduction potential. ③ The spatial variation in GHG emissions from incineration treatment was significant, and the provinces with higher emissions were mainly located in densely populated and economically developed regions. Jiangsu and Guangdong provinces had the highest emissions, and six provinces were low-value areas for emissions, including Gansu, Jilin, and Ningxia.

Key words: incineration treatment; greenhouse gas emissions; emission scenarios; carbon dioxide peaking; carbon neutralization

全球变暖趋势不断攀升, 为避免极端灾害, 有效控制温室气体排放, 各个国家和地区纷纷采取行动应对全球气候变化并制定减排目标, 碳达峰碳中和已成为全球热点问题^[1~3]. 废弃物部门是温室气体重要的排放源之一^[4,5], 占全球温室气体排放总量的 2%~5%^[6], 我国废弃物处理碳排放总量(以 CO_{2e} 计, CO_{2e} 为 CO₂ 当量)2005 年和 2014 年分别为 1.11 亿 t 和 1.95 亿 t, 年增长率为 6.46%^[7,8]. 2010~2019 年我国垃圾无害化处理量增加了 94.94%, 焚烧处理量增长了 425.49%, 焚烧处理率提高了 31.89%, 焚烧厂数由 104 座增加到了 390

座, 年均增长率为 13.10%, 我国城市生活垃圾填埋量从 2017 年开始下降, 2019 年焚烧量增长态势已经超过填埋量, 预计 2030 年前填埋处理趋近于零, 焚烧处理方式将成为处理废弃物的最佳选择^[9~11], 因此, 减少废弃物焚烧处理中的温室气体排放是迫切需要解决的问题^[12~14].

收稿日期: 2022-01-19; 修订日期: 2022-03-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1903901); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2021YSKY-09); 环境保护政策、法规、规划及标准项目(14402600000190006)

作者简介: 严薇(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废弃物温室气体清单, E-mail: Yanw821@nenu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: mazy@cares.org.cn

目前,有关焚烧处理温室气体减排的研究,主要集中在特定焚烧处理技术或方案^[15,16],温室气体减排管理措施^[17,18],以及温室气体排放现状等方面^[19,20],而对温室气体未来排放趋势的模拟预测研究较少,现有研究多聚焦于城市尺度以及较为发达的区域^[11,21],在国家层面研究存在空缺.关于温室气体排放量预测的方法有 LEAP 模型、灰色预测模型等方法^[14,22~24],但是这些方法多用于静态模拟,而系统动力学模型可以从根本影响因素及其影响作用出发建立预测模型^[25,26],进行不同情景的模拟预测^[27],实现动态可视化和对复杂系统运作方式的沟通^[28],在一定程度上具有高度灵活性.

本文综合考虑社会、经济和人口等因素,采用系统动力学的 Vensim 软件,嵌入 IPCC 温室气体排放量的计算方法,构建了焚烧处理温室气体排放模型,基于基线情景设定了 7 种减排情景,对温室气体排放量的变化趋势、减排潜力和空间分布进行研究,以期为我国在废弃物焚烧处理领域减缓气候变化、实现碳达峰碳中和目标,完成我国“十四五”控制温室气体排放的要求,推进区域温室气体减排工作提供思路 and 参考.

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文经济、人口和社会主要来自统计数据^[29~32],活动水平和排放因子来源于相关研究及行业标准等数据^[10,33~35].

1.2 模型构建

系统动力学方法是 Forrester 在 20 世纪 60 年代创立的,用于模拟一段时间内多个反馈和循环的影响及相互作用,从根本影响因素及其影响作用出发,实现动态可视化和复杂系统的运行^[36].该方法已经被广泛地应用于社会经济系统、生态系统、交通系统、环境管理和政策评估等领域的研究^[37~40].

本文综合考虑社会、经济和人口等因素,结合废弃物温室气体排放模拟的相关研究^[34,41],在 Vensim 软件^[42]中构建了运行时间为 2010~2050 年,仿真步长为 1 a 的焚烧处理温室气体排放模型(图 1).模型主要用箭头将常量、状态变量、速率变量和辅助变量进行相互连接^[36],焚烧处理温室气体排放模型集成了垃圾收集子系统、焚烧处理子系统和温室气体排放子系统,子系统间通过变量连接.例如,垃圾收集子系统和焚烧量子系统是通过垃圾无害化处理量连接,焚烧处理子系统和温室气体排放子系统通过对应废弃物类型温室气体排放因子相连.

垃圾收集子系统,体现了不同渠道产生和收集的垃圾数量,为预测焚烧处理废弃物年收集量提供基础数据,主要由生活垃圾年产生量、企事业单位垃圾年产生量、道路清扫垃圾年产生量以及回收比例组成^[33].生活垃圾产生量主要取决于总人口和人均垃圾产生量,其中总人口是由出生人口和死亡人口组成的,并由出生率和死亡率所决定.由于收入水平是生活水平的表现^[43],人均垃圾产生量受人均垃圾产生量初始值、垃圾处理收费影响参数和人均消

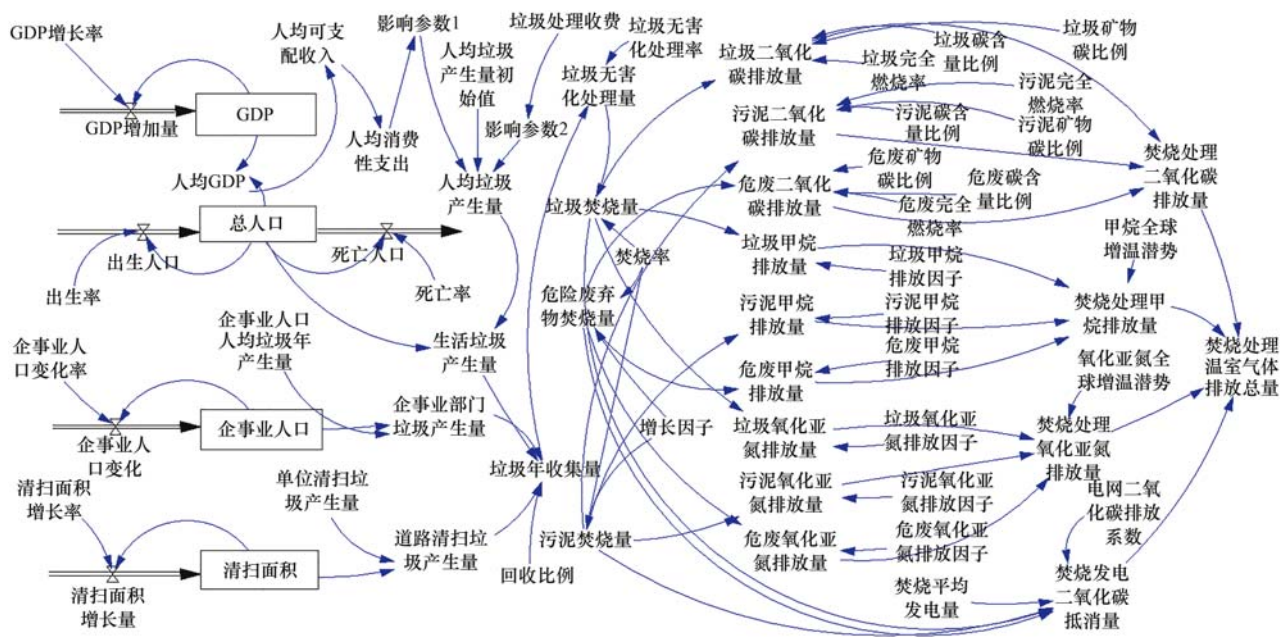


图 1 焚烧处理温室气体排放模型

Fig. 1 Greenhouse gas emission model for incineration treatment

费性支出影响参数的影响,由此构建了人均可支配收入和人均消费性支出的线性函数,以及人均消费性支出影响参数的表函数.此外,根据企事业单位人口和清扫面积的状态函数构建了企事业单位垃圾年产生量以及道路清扫垃圾年产生量.

焚烧处理子系统中的变量,包括无害化处理量、焚烧率、垃圾焚烧量和危险废弃物焚烧量以及污泥焚烧量.焚烧的废物类型主要包括城市固体废弃物、危险废弃物、污水污泥、医疗废弃物和工业固体废弃物,考虑到数据的可获得性,本文只选用了垃圾、危险废弃物和污泥 3 种废弃物并计算了各自的年焚烧量.

温室气体排放子系统,根据废弃物在焚烧处理不同燃烧状态和过程中,会产生 CO₂、CH₄ 和 N₂O 等温室气体,通常 CO₂ 排放量远多于 CH₄ 和 N₂O 的排放量的机制^[44],嵌入了 IPCC 方法^[35]推荐的废弃物焚烧处理 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放量计算公式,如式(1)和式(2)所示,排放因子取值见表 1.此外焚烧处理可以利用余热发电实现温室气体排放的部分抵消^[45],在模型中还增设了由平均发电量和电网 CO₂ 排放系数相乘得到的焚烧发电 CO₂ 抵消量,与焚烧处理 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放量共同组成焚烧处理温室气体排放总量,CH₄ 和 N₂O 百年全球增温潜势采用 CO₂ 的 28 倍和 265 倍^[46],最后进行排放总量的二氧化碳当量(CO_{2e})转换.

$$\text{Emissions-CO}_2 = \sum_i (IW_i \times \text{CCW}_i \times \text{FCF}_i \times \text{EF}_i \times 44/12) \quad (1)$$

式中,Emissions-CO₂为 CO₂ 排放量,单位为 Gg·a⁻¹; *i* 为焚烧的废弃物类型:城市固体废弃物(MSW)、危险废弃物(HW)和污水污泥(SS);IW_{*i*}为焚化或露天燃烧的固体废弃物类型 *i* 的总量,单位为 Gg·a⁻¹;CCW_{*i*}为第 *i* 种类型废弃物中的碳含量比例;FCF_{*i*}为第 *i* 类废弃物矿物碳在碳的总含量中的比例;EF_{*i*}为第 *i* 种类型废弃物焚烧炉的完全燃烧效率;44/12 为 C 到 CO₂ 的转换因子.

$$\text{Emissions-CH}_4/\text{N}_2\text{O} = \sum_i (IW_i \times \text{EF}_i) \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中,Emissions-CH₄/N₂O为清单年 CH₄ 或 N₂O 的排放量,单位为 Gg·a⁻¹; *i* 为焚烧的废弃物类型:MSW、HW 和 SS;IW_{*i*}为第 *i* 类废弃物的焚烧量(湿重),Gg·a⁻¹;EF_{*i*}为第 *i* 类废弃物的 CH₄(N₂O)排放因子(以 N₂O/污染物计),单位为 kg·Gg⁻¹;10⁻⁶为从 kg 转换为 Gg 的转换因子.

1.3 情景设定

基于现有焚烧处理的发展过程特点,结合现有国家发展计划批准的废弃物行业发展目标和政策,

以基线排放情景为基础,在焚烧处理过程中即源头、中端和终端阶段,选择关键减排技术进行情景设计,构建了单一和综合技术类型减排情景来预测我国废弃物焚烧处理温室气体的排放情况,具体情景描述及参数设定见表 2.

表 1 排放因子值

Table 1 Emission factor value			
气体类型	排放因子	推荐值	单位
CO ₂	CCW _{<i>i</i>}	MSW:20, HW:100, SS:30	%
	FCF _{<i>i</i>}	MSW:39, HW:90, SS:0	%
	EF _{<i>i</i>}	MSW:95, HW:97, SS:95	%
CH ₄	EF _{<i>i</i>}	MSW:30, HW:300, SS:9.7	kg·Gg ⁻¹
N ₂ O	EF _{<i>i</i>}	MSW:50, HW:100, SS:900	kg·Gg ⁻¹

2 结果与分析

2.1 模型检验

为检验模型能否准确反映系统的变化规律,采用历史检验方法进行有效性检验,对模型中 2010 ~ 2019 年 4 个关键变量的模拟值与实际值进行比较,见表 3,总人口、人均 GDP、人均可支配收入和无害化处理量模拟的平均相对误差分别为 0.35%、1.63%、1.16% 和 1.62%,均控制在保证模型准确的 10% 误差范围内^[52].因此,该模型是可靠且稳健的,能够准确地描述焚烧处理温室气体排放系统,反映各变量之间的实际关系.此外,模型也通过了 Vensim 软件的单位检查.

2.2 不同情景温室气体排放趋势

本研究模拟了 2010 ~ 2050 年全国焚烧处理产生的温室气体排放量的变化趋势.

以基线排放情景为基础的历史数据估算见图 2,2010 ~ 2019 年我国废弃物焚烧处理温室气体排放量以 9.96% 的速度增长,分为两个增长阶段.2010 ~ 2015 年,焚烧处理温室气体排放总量(以

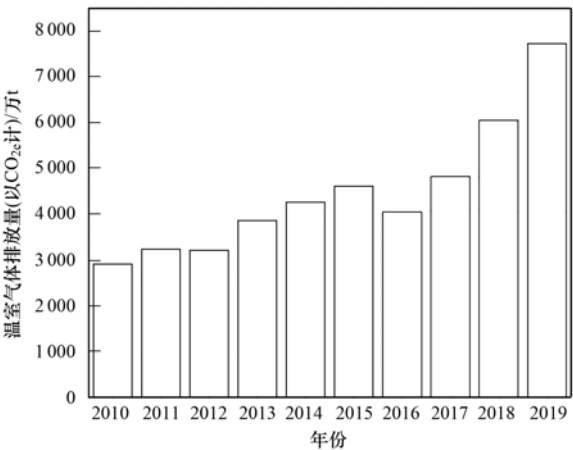


图 2 2010 ~ 2019 年焚烧处理温室气体排放量

Fig. 2 Greenhouse gas emissions from incineration from 2010 to 2019

表 2 不同情景设置

Table 2 Setting of different scenarios

技术类型	情景名称	情景描述	情景设定
无	基线排放情景(BAU)	2010~2019 年废弃物焚烧处理情况的外推	到 2050 年不采取任何减排政策措施
单一技术减排情景	源头减量情景(S1)	根据文献[47,48]对垃圾分类回收的目标和要求,在源头对垃圾采用分类回收利用技术,减少垃圾处理难度和垃圾产生量,对生活垃圾、垃圾部门和道路清扫产生量进行减量化处理,并采用回收技术,实现从源头控制垃圾数量 ^[33,34,43]	生活垃圾人均产生量、商业垃圾人均产生量和路面清扫垃圾产生量定额分别减少至 0.328 5、0.116 8 和 0.004 304;回收比例设置为 2020 年的 32%,2050 年为 60%,年增长率为 0.93%
	中端改进情景(S2)	根据文献[49]和焚烧效率的发展需要,普遍采用炉排炉和流化床炉等大型焚烧技术设备,逐渐减少小型焚烧炉应用,提高焚烧处理燃烧效率 ^[20,50]	增加焚烧处理比例,设定 2020、2030 和 2050 年焚烧率相比 2019 年分别提高了 10%、20% 和 60%
	终端减排情景(S3)	采用焚烧发电技术进行减排,根据清洁发展机制(CDM)和国家核证自愿碳减排量(CCER)项目的统计,我国垃圾焚烧厂平均垃圾发电量为 283~439 kW·h·t ⁻¹ ,参照美国等发达国家,提升我国焚烧发电技术的平均发电量 ^[6,9,10,51]	设定焚烧发电技术相比 2019 年提高 30%,之后每 5 年均增加 10.83%,到 2050 年实现减排 95%
综合技术减排情景	源头中端组合情景(S4)	对已经进行过分类回收的废弃物,采用改进的焚烧减排技术	综合考虑源头减量情景和中端改进情景改变参数设置
	源头终端组合情景(S5)	对已经进行过分类回收的废弃物,采用终端焚烧发电减排技术	综合考虑源头减量情景和终端减排情景改变参数设置
	中端终端组合情景(S6)	对已经采取过改进的焚烧减排技术,采用终端焚烧发电减排技术	综合考虑中端改进情景和终端减排情景改变参数设置
	全过程减排情景(S7)	将源头减量情景、效率提升情景和终端减排情景全部考虑在内的极限减排情景	综合考虑源头减量情景、中端改进情景和终端减排情景改变参数设置

表 3 模拟值与实际值的相对误差变化

Table 3 Relative error between actual value and simulated value

年份	总人口/万人		相对误差/%	人均 GDP/元·人 ⁻¹		相对误差/%	人均可支配收入/元·人 ⁻¹		相对误差/%	无害化处理量/万 t		相对误差/%
	模拟值	历史值		模拟值	历史值		模拟值	历史值		模拟值	历史值	
2010	134 091	134 735	0.48	30 587	30 808	0.72	12 520	12 398	0.97	11 457	11 318	1.21
2011	134 916	135 395	0.36	34 700	36 302	4.62	14 551	14 246	2.09	13 521	13 921	2.96
2012	135 922	136 057	0.10	39 106	39 874	1.96	16 510	16 242	1.62	14 583	14 890	2.10
2013	136 726	136 720	0.00	43 781	43 684	0.22	18 311	18 382	0.39	15 714	15 888	1.10
2014	137 646	137 384	0.19	47 905	47 173	1.53	20 167	20 270	0.51	16 841	16 915	0.44
2015	138 326	138 049	0.20	51 202	50 237	1.88	21 966	21 779	0.85	18 058	17 971	0.49
2016	139 232	138 716	0.37	54 930	54 139	1.44	23 821	23 486	1.41	18 624	19 055	2.31
2017	140 011	139 278	0.52	59 389	60 014	1.05	25 974	25 527	1.72	19 254	19 714	2.39
2018	140 541	139 733	0.57	64 918	66 006	1.68	28 228	28 058	0.60	19 981	20 386	2.03
2019	141 008	140 081	0.66	71 736	70 892	1.18	30 733	31 179	1.45	20 830	21 073	1.16

CO_{2e} 计,下同)从 2 910 万 t 增加到 4 604 万 t,年增速为 8.84%,而在第二阶段,排放总量由 2016 年 4 036 万 t 上升至 2019 年的 7 727 万 t,年涨幅为 18.61%。2016 年后温室气体排放量明显提速可能是因为,多项政策规划密集出台支持焚烧行业快速发展^[53~56],焚烧厂迅速增加,焚烧处理量和处理比例提高的同时导致温室气体排放增多。

2020~2050 年未来不同情景的数据模拟见图 3,单一技术减排情景温室气体排放量均呈增长趋势,S1、S2 和 S3 情景温室气体排放量由 2020 年的 5 878、5 958 和 5 508 万 t 上升至 2050 年的 10 244、8 272 和 5 827 万 t,年增长率分别为 74.25%、38.85% 和 5.79%,其中 S2 和 S3 情景分别于 2043

年和 2036 年出现排放峰值,对应的排放量为 8 410 万 t 和 6 966 万 t,S1 情景并未出现排放峰值。综合技术减排情景中 S5、S6 和 S7 情景排放量年下降率分别为 2.7%、31.6% 和 37.09%,峰值分别出现在 2029、2029 和 2021 年,对应的峰值排放量为 5 512、5 488 和 5 023 万 t,S4 情景的排放量以 32.85% 的速率增长,未出现排放峰值。由此可见,在源头采用分类回收技术可以在一定程度上削减焚烧处理中的温室气体排放量,但不会出现排放峰值;单一减排技术情景中在终端使用焚烧发电技术达峰时间相对较早;综合减排技术相比单一减排技术可以实现温室气体排放峰值提前,S7 情景采用了多种减排技术协同控制温室气体排放,使得温室气体排放最快达到

峰值且排放量最小。

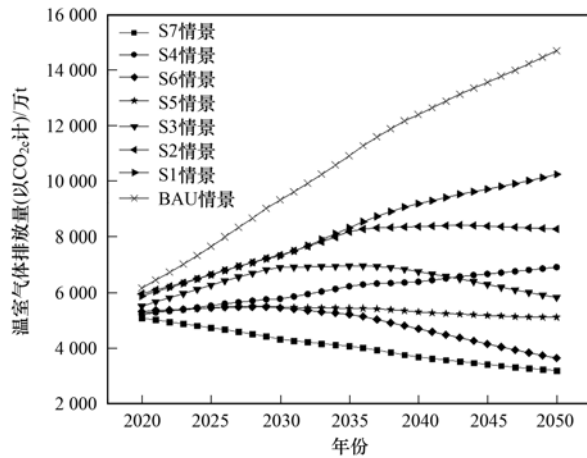


图3 不同减排情景下温室气体减排情景模拟结果

Fig. 3 Greenhouse gas emission simulation results under different emission reduction scenarios

2.3 不同情景温室气体排放减排潜力

减排潜力是在一段时间内将减排情景与基准情景相减得到的温室气体排放量,可为减排计划和发展路径的制定提供参考^[57]。2020~2050年不同情景焚烧处理温室气体减排潜力累积排放量变化见图4。2050年S3、S2和S1情景累积减排量依次为131 589、94 356和77 476万t,相对于BAU情景减排了60.38%、43.75%、30.35%,其中2036年S2情景减排潜力超过S1情景,说明分类回收技术减排效果稳定,从长远看在中端对焚烧处理技术改进提升更具有减排潜力,从整体看焚烧处理过程中末端减排潜力最好,随着焚烧发电量和上网电量稳步增加,可能实现焚烧处理过程中温室气体排放由源向汇的转换^[51,58];在综合减排技术情景中,S7情景2050年累积排放量为205 927万t,相较于BAU减排了78.27%,而S6、S5和S4情景相应减排了75.24%、52.95%和65.23%,并分别于2031年和2025年实现S6向S5、S5向S4阶段减排潜力的超越。由此可见S7情景减排措施对焚烧处理温室气体减排潜力最为显著,S6情景次之,因此仅考虑源头分类回收,中端提效减排技术的影响是不够的,必须在全过程采取有效的减排技术措施,充分发挥焚烧处理在中端和末端技术组合减排的优势,进行分阶段有序减排,对焚烧处理技术改进升级将对焚烧处理温室气体减排具有重要意义。

2.4 不同情景温室气体排放空间分布

我国经济 and 人口地区发展不均衡,各省废弃物产生量、焚烧处理能力差异显著,为更直观理解废弃物焚烧处理温室气体排放未来的空间差异变化,对2050年减排潜力最大的S7情景进行了省

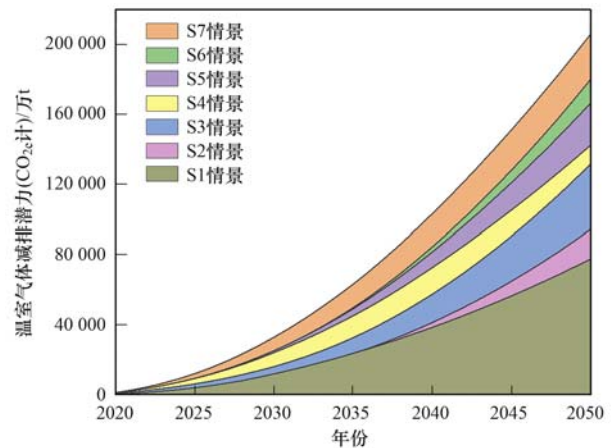


图4 不同减排情景下温室气体减排潜力

Fig. 4 Greenhouse gas emission reduction potential under different emission reduction scenarios

级空间分布分析。如图5所示,江苏和广东省是排放量最多的省份,温室气体排放量分别为170万t和161万t,共占全国总排放量的10.4%;山东、河南和上海等12个省份,温室气体排放量主要集中在120万~160万t,占全国排放总量的48.09%;江西、重庆和陕西等11个省份,排放量占全国排放总量的28.69%;甘肃、吉林和宁夏等6个省份为温室气体排放的低值区,排放量少于80万t。焚烧处理温室气体排放量较多的省份主要分布在胡焕庸人口密度分界线以南人口密集且经

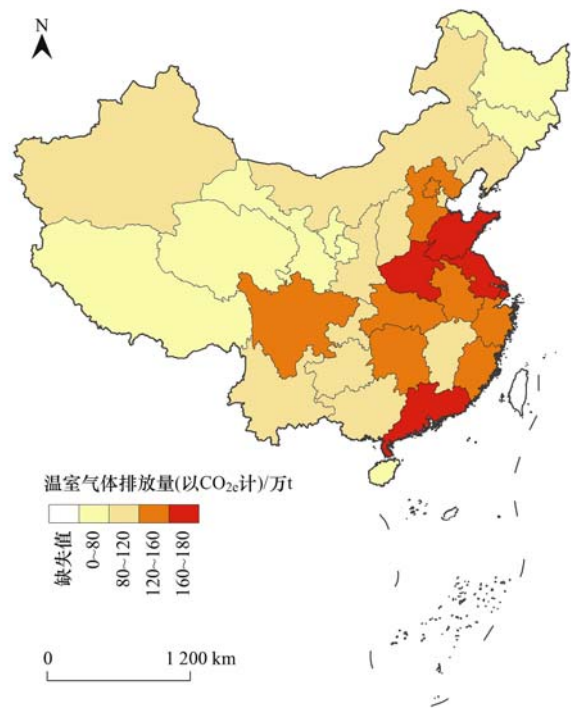


图5 2050年各省份温室气体焚烧处理温室气体排放量及其空间分布

Fig. 5 Greenhouse gas incineration emissions and their spatial distribution by province in 2050

济发达的区域。

3 讨论

本文对废弃物焚烧处理现状和未来趋势变化进行了研究,为我国焚烧处理温室气体减排工作提供一定的参考价值。但仍存在一定的局限性,由于可获得的数据有限,废弃物种类仅涉及了生活垃圾、危险废弃物和污泥,日后可增加工业固体废弃物等废弃物类型。此外,由于焚烧处理过程中温室气体排放量估算的不确定性受排放因子、活动水平和减排技术升级等因素的共同影响,最后对不确定性变量采用 IPCC 误差传递法进行不确定分析,得到预估结果不确定性约为 35%,因此,本研究估算的结果存在较大的不确定性,排放活动水平数据和本地化排放因子的匮乏是不确定性的主要来源。随着国家对焚烧厂温室气体减排越来越重视,对于废弃物焚烧处理减排技术的选择,可以重点放在焚烧发电减排技术方面,在全过程综合采用更多的减排技术,才能实现温室气体减排潜力的最大化。

4 结论

(1) 2010~2019 年我国废弃物焚烧处理温室气体排放量呈增加趋势,2016 年排放总量(以 CO_2e 计,下同)为 4 036 万 t 上升至 2019 年的 7 727 万 t,年增速为 18.61%,相较于 2010~2015 年增速显著上升。期间多项政策规划密集出台支持焚烧行业快速发展,焚烧厂和焚烧处理量显著增加,导致了温室气体排放的增多。

(2) 2020~2050 年,单一技术减排情景排放趋势均呈现增长趋势,S2 和 S3 情景分别于 2043 年和 2036 年达到峰值 8 410 万 t 和 6 966 万 t,S1 情景并未出现排放峰值。S5、S6 和 S7 情景排放量峰值分别出现在 2029、2029 和 2021 年,综合技术减排相比单一技术减排可以实现温室气体排放峰值提前,S7 情景采用了多种减排技术协同控制温室气体排放,温室气体最快达到峰值且排放量最小。2050 年 S3 情景、S2 情景和 S1 情景累积减排量依次为 131 589、94 356 和 77 476 万 t,综合技术减排情景中 S7 情景减排潜力最大。

(3) 焚烧处理温室气体排放空间差异显著,排放量较多的省份主要分布在胡焕庸人口密度分界线以南人口密集且经济发达的区域,其中,江苏和广东省是排放量最多的省份,分别为 170 万 t 和 161 万 t,甘肃、吉林和宁夏等 6 个省份是温室气体排放的低值区。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] Zickfeld K, Solomon S, Gilford D M. Centuries of thermal sea-level rise due to anthropogenic emissions of short-lived greenhouse gases[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, **114**(4): 657-662.
- [3] Gao Y, Gao X, Zhang X H. The 2°C global temperature target and the evolution of the long-term goal of addressing climate change—from the United Nations Framework Convention on climate change to the Paris agreement[J]. Engineering, 2017, **3**(2): 272-278.
- [4] Chen F Y, Chen H, Wu M F, et al. Research on the driving mechanism of waste separation behavior: based on qualitative analysis of Chinese urban residents[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(10), doi: 10.3390/ijerph16101859.
- [5] 李金珊, 何易楠, 胡凤乔. 应对气候变化的低碳政策研究 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2015.
- [6] Song Q B, Wang Z S, Li J H, et al. Comparative life cycle GHG emissions from local electricity generation using heavy oil, natural gas, and MSW incineration in Macau [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, **81**: 2450-2459.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告[R/OL]. 2018. <http://www.ccchina.org.cn/archiver/NCCen/UpFile/Files/Default/20200723171645386286.pdf>, 2021-12-24.
- [8] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[R]. 北京: 中国经济出版社, 2013.
- [9] 徐海云. 全球生活垃圾焚烧处理发展分析[J]. 城市管理与科技, 2014, **16**(6): 21-24.
- [10] 徐海云. 垃圾焚烧未来有可能实现“负碳”[J]. 环境经济, 2021, (12): 42-45.
- [11] 谢鹏程, 王文军, 王文秀, 等. 广州市生活垃圾处理的温室气体排放现状与预测[J]. 科技管理研究, 2020, **40**(14): 247-252.
- Xie P C, Wang W J, Wang W X, et al. Current status and forecasts of greenhouse gas emissions from urban domestic waste treatment of Guangzhou [J]. Science and Technology Management Research, 2020, **40**(14): 247-252.
- [12] Demirbas A, Alamoudt R H, Ahmad W, et al. Optimization of municipal solid waste (MSW) disposal in Saudi Arabia[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2016, **38**(13): 1929-1937.
- [13] Gao Q X, Du W P, Lu S Q, et al. Methane emission from municipal solid waste treatments in China[J]. Climate Change Research, 2007, **3**(S1): 70-74.
- [14] Yao X L, Guo Z, Liu Y, et al. Reduction potential of GHG emissions from municipal solid waste incineration for power generation in Beijing[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **241**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118283.
- [15] Hwang K L, Choi S M, Kim M K, et al. Emission of greenhouse gases from waste incineration in Korea [J]. Journal of Environmental Management, 2017, **196**: 710-718.
- [16] Astrup T, Møller J, Fruergaard T. Incineration and co-combustion of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions[J]. Waste Management & Research: the Journal for a Sustainable Circular Economy, 2009, **27**(8): 789-799.
- [17] Mohareb A K, Warith M A, Diaz R. Modelling greenhouse gas

- emissions for municipal solid waste management strategies in Ottawa, Ontario, Canada [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, **52**(11): 1241-1251.
- [18] Wang Y, Geng S N, Zhao P, *et al.* Cost-benefit analysis of GHG emission reduction in waste to energy projects of China under clean development mechanism[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, **109**: 90-95.
- [19] Bian R X, Zhang T X, Zhao F B, *et al.* Greenhouse gas emissions from waste sectors in China during 2006- 2019: implications for carbon mitigation [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, **161**: 488-497.
- [20] Liu Y J, Chen S Q, Chen A J Y, *et al.* Variations of GHG emission patterns from waste disposal processes in megacity Shanghai from 2005 to 2015[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **295**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126338.
- [21] 甘晖, 杨燕燕, 刘佳, 等. 福建省2000-2020年间废弃物处理温室气体排放估算及趋势预测[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2018, **34**(5): 93-100.
- Gan H, Yang Y Y, Liu J, *et al.* Waste disposal greenhouse gas emissions estimation and trend forecast in Fujian province during 2000-2020[J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, **34**(5): 93-100.
- [22] Fang Y R, Li S B, Zhang Y X, *et al.* Spatio-temporal distribution of sewage sludge, its methane production potential, and a greenhouse gas emissions analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **238**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117895.
- [23] Lin J Y, Kang J F, Khanna N, *et al.* Scenario analysis of urban GHG peak and mitigation co-benefits: a case study of Xiamen City, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **171**: 972-983.
- [24] 庞可, 张芊, 马彩云, 等. 基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3386-3395.
- Pang K, Zhang Q, Ma C Y, *et al.* Forecasting of emission Co-reduction of greenhouse gases and pollutants for the road transport sector in Lanzhou Based on the LEAP Model[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3386-3395.
- [25] Chen Y C, Liu H M. Evaluation of greenhouse gas emissions and the feed-in tariff system of waste-to-energy facilities using a system dynamics model[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **792**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148445.
- [26] Pinto J T M, Sverdrup H U, Diemer A. Integrating life cycle analysis into system dynamics: the case of steel in Europe[J]. *Environmental Systems Research*, 2019, **8**(1), doi: 10.1186/s40068-019-0144-2.
- [27] Feng Y Y, Chen S Q, Zhang L X. System dynamics modeling for urban energy consumption and CO₂ emissions: a case study of Beijing, China[J]. *Ecological Modelling*, 2013, **252**: 44-52.
- [28] Anand S, Dahiya R P, Talyan V, *et al.* Investigations of methane emissions from rice cultivation in Indian context [J]. *Environment International*, 2005, **31**(4): 469-482.
- [29] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2010-2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010-2019.
- [30] 国家统计局, 环境保护部. 2010-2018 中国环境统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2010-2019.
- [31] 国家统计局. 中国城市建设统计年鉴 2009-2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010-2019.
- [32] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境统计年鉴 2009-2018 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010-2019.
- [33] 张蕾, 席北斗, 王京刚, 等. 系统动力学方法在城市生活垃圾产生系统的应用[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(5): 72-78.
- Zhang L, Xi B D, Wang J G, *et al.* The application of system dynamics method in municipal solid waste generation system[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **20**(5): 72-78.
- [34] 瞿思佳. 基于 GIS-SD 中国垃圾填埋场甲烷排放趋势及减排措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- Qu S J. A study on trends and reduction measures of methane emission in China's landfills based on GIS-SD model [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [35] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. <http://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>, 2021- 09-01.
- [36] 王其藩. 高级系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [37] Saysel A K, Barlas Y. A dynamic model of salinization on irrigated lands [J]. *Ecological Modelling*, 2001, **139**(2-3): 177-199.
- [38] Suryani E, Chou S Y, Chen C H. Air passenger demand forecasting and passenger terminal capacity expansion: a system dynamics framework [J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, **37**(3): 2324-2339.
- [39] Hu G Z, Zeng W H, Yao R H, *et al.* An integrated assessment system for the carrying capacity of the water environment based on system dynamics [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **295**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113045.
- [40] Kunsch P, Springael J. Simulation with system dynamics and fuzzy reasoning of a tax policy to reduce CO₂ emissions in the residential sector[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, **185**(3): 1285-1299.
- [41] 任佳雪, 高庆先, 陈海涛, 等. 碳中和愿景下的污水处理厂温室气体排放情景模拟研究[J]. *气候变化研究进展*, 2021, **17**(4): 410-419.
- Ren J X, Gao Q X, Chen H T, *et al.* Simulation research on greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants under the vision of carbon neutrality [J]. *Climate Change Research*, 2021, **17**(4): 410-419.
- [42] 钟永光, 贾晓菁, 钱颖. 系统动力学[M]. (第二版). 北京: 科学出版社, 2013.
- [43] 唐睿. 城市固体废弃物系统动力学模型与综合处理基地选址分析[D]. 厦门: 华侨大学, 2020.
- Tang R. Municipal solid waste (MSW) system dynamics model and comprehensive treatment base site locational analysis [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2020.
- [44] 马占云, 高庆先. 废弃物处理温室气体排放计算指南[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- Ma Z Y, Gao Q X. Guideline for calculating GHG Emissions of Waste disposal [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [45] Xiao S J, Dong H J, Geng Y, *et al.* Greenhouse gas emission mitigation potential from municipal solid waste treatment: a combined SD-LMDI model[J]. *Waste Management*, 2021, **120**: 725-733.
- [46] IPCC. Climate change 2014: synthesis report: contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [47] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国固体废物污染环境防治法 [EB/OL]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_12998447, 2020-04-29.
- [48] 国务院办公厅. 生活垃圾分类制度实施方案 [EB/OL].

- http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-03/30/content_5182124.htm, 2017-03-18.
- [49] 国家发展改革委, 住房城乡建设部. 国家发展改革委 住房城乡建设部关于印发《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-05/14/content_5606349.htm, 2021-05-06.
- [50] 李崇, 任国玉, 高庆先, 等. 固体废物焚烧处置及其清洁发展机制[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(7): 819-827.
Li C, Ren G Y, Gao Q X, *et al.* Solid Waste incineration disposal and associated CDM in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, **24**(7): 819-827.
- [51] 赵海波, 宋蕾. 碳达峰、碳中和背景下我国垃圾焚烧发电行业发展展望[J]. 开发性金融研究, 2021, (4): 11-20.
Zhao H B, Song Q. Prospects for the development of waste incineration power generation industry of China under the background of carbon peak and carbon neutrality [J]. Development Finance Research, 2021, (4): 11-20.
- [52] Du L L, Li X Z, Zhao H J, *et al.* System dynamic modeling of urban carbon emissions based on the regional national economy and social development plan: a case study of Shanghai city[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **172**: 1501-1513.
- [53] 国家发展改革委, 住房城乡建设部. 国家发展改革委 住房城乡建设部关于印发《“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》的通知[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201701/t20170122_962225.html?code=&state=123, 2016-09-26.
- [54] 国务院. 国务院关于印发“十三五”生态环境保护规划的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-12/05/content_5143290.htm, 2016-12-05.
- [55] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国国土资源部, 等. 关于进一步加强城市生活垃圾焚烧处理工作的意见[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/gwy/201611/t20161124_368164.htm, 2016-12-12.
- [56] 国家发展改革委, 住房城乡建设部, 国家能源局, 等. 关于进一步做好生活垃圾焚烧发电厂规划选址工作的通知[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201712/t20171220_960931.html?code=&state=123, 2017-12-20.
- [57] 李辉, 孙雪丽, 庞博, 等. 基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5563-5573.
Li H, Sun X L, Pang B, *et al.* Emission reduction potential of air pollutants of thermal power industry based on carbon emission reduction target and emission standard constraint scenarios[J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 5563-5573.
- [58] 何品晶, 陈淼, 杨娜, 等. 我国生活垃圾焚烧发电过程中温室气体排放及影响因素——以上海某城市生活垃圾焚烧发电厂为例[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(3): 402-407.
He P J, Chen M, Yang N, *et al.* GHG emissions from Chinese MSW incineration and their influencing factors-Case study of one MSW incineration plant in Shanghai[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(3): 402-407.

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i> (5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning (5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i> (5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i> (5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu (5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i> (5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i> (5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i> (5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i> (5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i> (5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i> (5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i> (5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i> (5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i> (5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i> (5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i> (5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i> (5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i> (5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i> (5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i> (5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i> (5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i> (5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i> (5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i> (5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i> (5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i> (5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i> (5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i> (5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i> (5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i> (5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i> (5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i> (5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> (5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i> (5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i> (5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i> (5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i> (5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i> (5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i> (5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i> (5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i> (5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin (5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao (5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i> (5861)